第39卷第1期 昆虫学报 Vol. 39, No.1
1996年2月 ACTA ENTOMOLOGICA SINICA Feb., 1996

探地雷达探测堤坝白蚁巢研究*

徐兴新 吴晋 吴相安 李栋 饶绮珍
(中国科学院广州地质新技术研究所 广州 510640) (广东省昆虫研究所 广州 510260)

摘要 消除堤坝白蚁隐患的关键是找出白蚁的主巢穴。我们通过试验,证明应用探地雷达技术能够准确地确定出蚁巢在地下的空间位置,并掌握了蚁巢的影像特征和蚁巢规模大小的计算方法。这种方法具有很高的工作效率和几何分辨率,且以直观的图像实时显示,有较高的推广价值和发展前景。

关键词 白蚁,堤坝,探地雷达

堤坝白蚁一直是我国南方诸省土质水利工程最主要的隐患之一,消除堤坝白蚁隐患的关键问题是找出白蚁的主巢穴[1,2]。数十年来,我国科技工作者为实现物理方法找巢进行过许多探索,但均未取得满意结果。我们通过对白蚁巢穴的物理性质、空间结构进行较全面的分析和对各种物理方法进行筛选,优选出技术较先进的探地雷达探测方法。通过模拟试验、实地探巢试验和垂直切片式开挖解剖分析,证明使用这种方法能够探测活巢和死巢在地下的空间位置及其规模大小。这种方法能以步行的速度探测,也可以车载的方式探测,探测结果是以直观的图像方式实时显示,有较高的推广应用价值和发展前景。

1 探地雷达工作原理

探地雷达由主机、收发天线、图像处理显示系统几个部分组成。由发射脉冲源发出的脉宽为毫微秒量级的视频脉冲,经宽带发射天线耦合到地下。当发射的脉冲波在地下传播过程中遇到电性不同的界面或目标物,一部分脉冲波能量被反射回地面,由地面上的宽带接收天线所接收。取样接收电路在雷达主机取样控制电路控制下,按等效时间取样原理将接收到高速重复的视频脉冲信号变换成低频信号并送至显示系统处理。实际探测过程,天线沿地面移动,脉冲信号不断地被发射和接收,显示系统将经 A/D 转换后得到的数据信号按一定方式进行编码排列及处理,以二维形式给出连续的地下纵向剖面成象图像。图像的水平坐标表示地面不同的位置;垂直坐标为脉冲的双程传播时间,该时间可以换算为深度,使用发射和接收并用天线(或发、收分离但距离为0),深度 Z 的计算分式为:

$$Z=\frac{t\cdot c}{2\sqrt{\varepsilon_{\gamma}}}$$

其中 c 为电磁波在空气中的传播速度($c=0.3\,\mathrm{m/ns}$),ε_r 为介质的相对介电常数,t 为脉冲从地表到目标物再从目标物反射回地表的双程传播时间[3]。探测剖面内各处对脉冲波

* 国家自然科学基金项目(49171051)和广东省重点科技项目部分成果
1994-11-08收稿,1995-05-02收修改稿

的反射强弱在图像上以不同的灰度或不同的颜色表示。

探地雷达满足如下雷达方程：

$$P_R = \frac{P_T G^2 \lambda_0^2 S}{(4\pi)^3 R^4} L_{01} L_{10} L_s e^{-4\alpha R}$$

其中 P_T、P_R 分别为发射接收功率，G 为天线增益，λ_0 为雷达波的波长，S 为地下目标的散射截面，R 为目标深度，α 为土壤衰减率，L_{10}、L_{01} 分别是收发天线与地面耦合的损耗，L_s 为传播媒质的散射损耗[4]。

可以看出，探地雷达接收到的信号的强弱与探地雷达天线的特征、土壤的衰减、目标的深度与反射特征、雷达的工作频率和发射功率均有关系。

存在于堤坝中的蚁巢、蚁道与周围土壤介电常数存在较大的差异，根据电磁波反射原理，在分界面会对探地雷达发射的电磁波产生反射，这就是应用探地雷达探测堤坝白蚁巢的依据。

2　模拟试验及其结果分析

2.1　模拟试验条件、仪器、方法及结果

模拟试验场的土质为花岗岩原生风化土，1992 年 10 月测试，土壤含水量随深度变化很小，平均为 20% 左右，相对介电常数 10.4。试验场选在一个顶部地面平坦侧边为陡坡(约 80°)的台阶上。在陡坡面上距顶部不同深度的地方水平向内掏不同直径长度均为 150cm 的圆柱形空洞 12 个，作为测试目标。探测剖面线布置在台阶顶部距陡坡边沿约 50cm 处，与下面的圆柱形空洞的走向相垂直。

探测仪器采用美国地球物理勘探设备公司(Geophysical Survey Systems Inc.)生产的 SIR System－10 型探地雷达(Subsurface Interface Radar)，选用 500MHz 和 300MHz 两种天线，取样率(samples/scan)为 512，时窗取 80ns，天线由人工以正常的步行速度拖动。所取得的图像采用密度分割式(即将接收信号按强弱划分成若干等级，不同等级的信号在图像上以不同的颜色表示)方法进行处理。

表 1　试验场洞穴及其雷达影像数据

序号	洞直径 (cm)	洞顶距地表深度 (cm)	500 MHz 天线		300 MHz 天线	
			影像反映宽度 (cm)	影像增加宽度 (cm)	影像反映宽度 (cm)	影像增加宽度 (cm)
1	7.5	56	107	100		
2	7.5	116	157	150		
3	15	58	141	126		
4	30	99	200	170		
5	30	175	137	107		
6	30	244	95	65		
7	50	117	206	156	219	170
8	50	162	172	122	247	195
9	50	245	114	64	146	110
10	50	312			111	71

此次试验，用500 MHz天线取得9个空洞的影像，用300 MHz天线取得4个空洞的影像。从图像上量出的空洞影像宽度乘以图像比例尺为影像反映宽度，影像反映宽度减去空洞的直径为影像增加宽度，所取得的结果列于表1。

2.2 模拟试验结果分析

2.2.1 浅层空洞在图像上的影像特征为顶部向上弯曲的、多重的强弱信号条纹相间的异常区。随着空洞深度加大，在图像上的强弱信号相间条带明显减少，较深处的空洞的影像为一条向上凸起的双曲线形。最高处为空洞的顶部位置。

2.2.2 500 MHz天线最大探测深度为2.45 m左右，可识别直径7.5 cm、或更小的空洞。300 MHz天线最大探测深度大于3.12 m，分辨率稍低于500 MHz天线。

2.2.3 当土壤介质较均匀，含水量变化不大时，不同深度波速变化不大。试验场不同深度的单位双程走时在19.2 ~ 23.2 ns/m之间。

2.2.4 图像上反映出的空洞的影像宽度比实际宽度大1.2 ~ 13.3倍。影像增加宽度与所使用的探测频率和深度变化相关，空洞的实际大小对影像增加宽度的影响不明显。

2.2.5 影像增加宽度与深度的相关关系

探地雷达天线有相当大的发射角和接收角（大约90度），除能接收到正下方的信息外，也会接收到近旁的信息。在一定的深度范围内，对于较深处的目标，地面能探测到的范围较大，其影像增加宽度也较大。但是，虽然天线是90°的立体发射角，但各个角度的辐射能量不同，一般垂直地面方向的辐射能量最大，偏离垂线方向的角度越大，辐射能量越小。此外，接收天线也存在对于来自偏斜方向的能量的接收效果较差的情况。因此，在土壤对辐射和反射能量存在吸收和衰减的条件下，有效探测视场角必然会随深度的增加而逐渐减小，影像增加宽度也会随之减小。因此，随着深度由浅到深，影像增加宽度的变化规律为：小→大→小。

我们对所取得的试验数据进行影像增加宽度与深度的相关关系分析，得出影像增加宽度 Y 与深度 X 呈：

$$Y = ax^3 + bx^2 + cx + d$$

关系。500 MHz频率式中的系数：$a = 8.793*10^{-5}$，$b = -0.045$，$c = 6.462$，$d = -125.872$；300 MHz频率式中的系数：$a = 7.703*10^{-5}$，$b = -0.052$，$c = 10.616$，$d = -476.062$。相关曲线见图1。曲线上 Y 最大值点对应的深度为影像增加宽度达到最大时的深度。从最大 Y 值处可将曲线分为左右两个部分，左部可看出影像增加宽度与深度呈正相关关系，表明较浅的空洞的影像增加宽度主要受视探测视场的影响；右部影像增加宽度与深度呈负相关关系，表明随着深度增加有效探测角逐渐减小，影像增加宽度主要受有效探测视场的影响。

300 MHz频率与500 MHz频率相比较，Y 最大值所对应的深度和影像增加宽度都较大，显示了前者分辨率较低和对土壤的穿透较好的特点，然而两者的变化趋势基本相同。虽然300 MHz频率的数据量偏少，但根据曲线的变化情况以及与500 MHz频率曲线相比较来看，符合电磁波在土壤中传播和衰减的规律，因此300 MHz频率的相关分析结果具有一定的可信程度。

因为影像增加宽度是两倍的有效探测视场边界与被测物边界相交时天线的位置到这

一边界正上方的距离，所以影像增加宽度与被测物的大小和形状关系不大，也就是说仪器性能、探测频率、土壤性质、被测物体深度这些条件不变时，不同大小和不同形状的被测物的影像增加宽度几乎是一样的。

影像增加宽度也正是有效探测宽度。因此图1也表达了有效探测宽度与深度的关系，同时又表明了有效探测视场范围随深度变化的规律。

3 实地探测实验与蚁巢影像特征分析

3.1 实验条件、步骤、结果

3.1.1 实验条件

本项目共选取了6个白蚁活动区(蚁巢的位置是未知的)作为实测实验场。测试仪器、使用频率、测试季节和土壤条件均与模拟试验场相同。试验场的探测剖面间距为4 cm或50 cm，以正常的步行速度拖动天线，共测剖面113条，剖面线总长度415 m。

3.1.2 试验步骤

(1) 沿布置的剖面线测试获取剖面的图像资料，并对图像进行密度分割处理，突出有用信息。

(2) 依据模拟试验取得的空洞影像特征、宽度放大规律等方面的分析结果，对蚁巢区的图像进行分析，找出异常并计算出异常的平面坐标位置、直径及深度。

(3) 对所有的解释结果进行打孔验证：先按图像确定出异常区的平面坐标位置，用一根直径8 mm的长铁钎按预测深度打一孔，后用草秆或竹篾插入洞内停留几分钟后拉出。若是蚁巢，就会钓出白蚁。

(4) 对4个实验场均按探测剖面排列顺序进行垂直切片式挖开，进行验证和分析。

(5) 进行影像宽度修正试验。即，用影像宽度减去影像增加宽度所得推测结果与被测物宽度相比较是否相符。

3.1.3 试验结果

(1) 对6个试验场进行的打孔验证，除一个试验场的异常区证实为白蚁死亡或迁移后留下的空洞未吊出白蚁外，其余5个均有白蚁吊出。这5个点共打孔34个，一次打孔见蚁率约达80%，一次打孔未见蚁的经修正方向后重新打孔大部分见蚁。

(2) 蚁巢、空洞和较浅的蚁道均能探测出来。图像上凡有反映空洞性质异常的位置，均证实有菌圃或空洞存在。

(3) 各开挖的试验点的图像上反映出的规模最大且反射信号很强的异常区都抓到蚁王和蚁后证实为主巢位置。其中最深的主巢的顶部距地表达2.29 m。4个试验点共挖出菌圃或空洞470多个，净体积2.02 m^3。

(4) 单个菌圃、菌圃群、主巢均存在影像宽度大于实际宽度的现象，影像增加宽度随深度变化的规律与模拟试验得出的结果基本一致。主巢和单个菌圃的影像宽度根据模拟试验得出的方程 $y=ax^3+bx^2+cx+d$ 修正后与实测宽度数据基本相符，对于菌圃群的修正效果稍差些。

3.2 影像特征

经解剖验证，蚁巢、菌圃群、蚁道和电性不同土壤介面在图像上的影像特征如下：

3.2.1. 主巢的图像特征

主巢和呈密集状态分布的菌圃群均为顶部为弧形的块状，但主巢的规模一般都比较大。

(1) 较浅主巢(包括紧靠主巢的菌圃)的影像特征

与深度较浅空洞的影像特征相似，反射信息极强，有多条强、弱信号条带相间分布，规模较大。图版 I:1 右上方异常区为顶部离地表只有 34 cm 深的主巢的影像。图版 I:2 是 2 ～ 15 号剖面解剖的情况。

(2) 深度较大主巢(包括紧靠主巢的菌圃)的影像特征

与较浅主巢的影像相比，反射信息减弱，强、弱信号条带数少而疏，但蚁巢顶部与土壤的界面清楚，规模较大(见图版 I:3 的下部)。图 2 下部是主巢的解剖结果。

3.2.2 菌圃群的影像特征

由于影像存在宽度增加的现象，在两个或多个菌圃(或空洞)在水平或垂直方向比较靠近的情况下，它们的影像互相重叠，以一个整体表现在图像上，只能判断出整个菌圃群范围的大小，不易分辨出菌圃的数目。但规模比主巢小(见图版 I:3 左上部，解剖情况见图 2 左上部)。

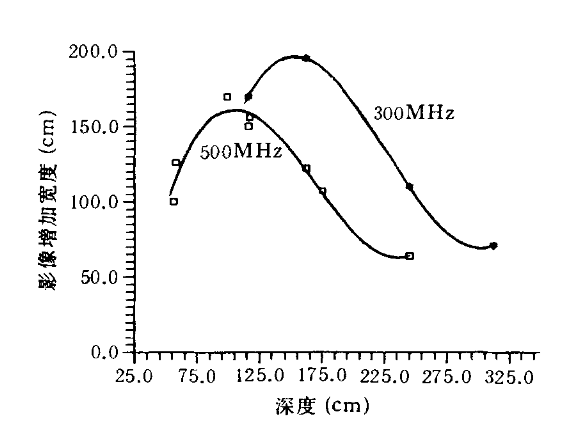


图 1 影像增加宽度与深度的关系

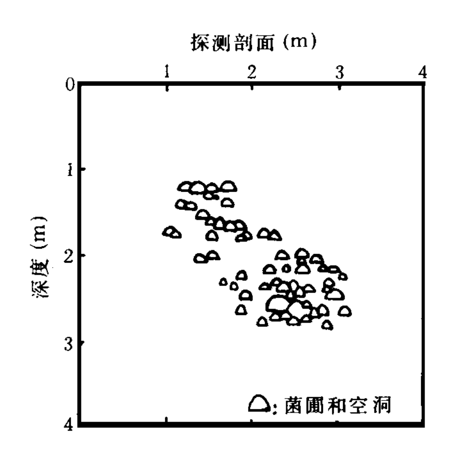


图2 4 ～ 1 剖面解剖结果记录图(对应图片 3)

3.2.3 单个菌圃(空洞)的影像特征

单个菌圃的图像多为单层或双层对称的双曲线形状。双曲线的层数随蚁巢所处深度的增加而减少。在两个大菌圃群之间或主巢与大菌圃群之间的呈零星分布的菌圃，在图像上表现出来的不是双曲线形状的条纹，而是以点状组成的不规则形状的强反射信号区。

3.2.4 蚁道的影像

与探测剖面线重合或偏离不远的蚁道，在图像上显示为一条强信号条带，图片 4 为一条平均直径 7 cm，离地表距离 1.2 m 左右的一条蚁道的影像，突然间断处为蚁道的转向处。

3.2.5 土壤分界面影像

电性不同的地质界面与大蚁道都会产生较直的强信号条带，两者影像的主要差别在于蚁道会出现突然消失的现象，而土壤分界面影像则不会出现这种现象。

4 结　语

4.1 模拟试验和探巢实验的结果表明：① 探地雷达选用500 MHz 和 300 MHz 频率天线，分辨率符合堤坝白蚁巢探测的要求，探测深度分别为 2.5 m 和大于 3.1 m；② 2.5 m 深度以内成年蚁巢探出率可达 100%（开挖解剖验证，实验区内无更深的主巢。根据模拟测试结果，500 MHz 天线应能探测 3 m 左右的主巢）。由此可说明，这种方法在探测深度特别是成年巢探出率方面相当理想。

4.2 应用探地雷达探测堤坝白蚁巢工作效率高，不受死巢、活巢的限制，可精确确定蚁巢的地下空间位置和经过校正后准确确定蚁巢的规模大小，是目前灭白蚁护堤坝最理想的新方法和新技术。我国南方诸省、区土质水利工程应用该项新技术，基本上可确保避免因蚁患导致的崩堤灾难发生，其经济效益和社会效益将是十分显著的。

4.3 对于不同类型、不同含水量、不同地区土壤的探测效果方面的研究，以及堤坝加高培厚蚁巢埋深超过2.5 m 的探测研究，目前正在进行。

致谢 参加本项目研究的人员还有中国科学院广州地质新技术研究所的董裕国；广东省水利电力厅的李孟稔、姚达长、黄顺明同志。该项研究得到广东省水利电力厅茹建辉副总工程师、谢汉祥副厅长的鼎力支持。在此致以衷心谢意。

参　考　文　献

1 李栋．堤坝白蚁．成都：四川科学出版社，1989，12

2 李桂祥，戴自荣，李　栋．中国白蚁与防治方法．北京：科学出版社，1989

3 王惠濂等．探地雷达专辑．地球科学，1993，7（3）：251

4 范国新等．探地雷达原理、设计思想及其实现．电波科学学报，1992，7(3)：1 ～ 18

A STUDY ON GROUND PENERTRATING RADAR EXPLORATION OF SUBTERRANEAN TERMITES NESTS IN DYKES AND DAMS

Xu Xingxin Wu Jin Wu Xiangan
(*Guangzhou Institute of New Technique on Geology, Academia Sinica Guangzhou* 510640)
Li Dong Rao Qizhen
(*Guangdong Institute of Entomology Guangzhou* 510260)

Abstract The key to remove hidden danger of subterranean termites in dykes and dams is how to find out the nests. Our study indicates that the subteranean termites nests can be exactly discovered for the underspace positions by using Grand Penertrating Radar, mastered thier image features and the calculation for thier deepth and size. As the method has got a higher effieciency and a higher geometric resolving power, and image showing in right time, it is regarded a break through in the field of the subteranean termites nests detection. It can be considered of great value for application, and has good prospect in its development.

Key words termite, dykes and dams, Grand Penertrating Radar

图 版 说 明

图版 I

1. 较浅主巢的影像(2 ～ 15号剖面，500 MHz天线);
2. 2 ～ 15号剖面解剖情况
3. 较深主巢的影像(4 ～ 1号剖面，500 MHz天线);
4. 蚁道的影像